1Б

УДК 004.942

***А.В. Бухановский, Ю.И. Нечаев***
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия
nechaev@mail.ifmo.ru

# Концепция исследовательского проектирования морских судов на основе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислительных средств

Рассматривается подход и концептуальный базис методов и моделей на современном этапе развития учения об исследовательском проектировании. Сформулированы теоретические принципы формализации проблемы с использованием достижений интеллектуальных технологий и высокопроизводительных средств вычислений. Приведены примеры реализации разработанного подхода в практических приложениях исследовательского проектирования морских судов.

## Парадигма исследовательского проектирования на основе концепции климатических спектров морского волнения

Создание формальной системы, описывающей поведение судна в сложной динамической среде, описываемой с помощью нового подхода к интерпретации динамики внешней среды, осуществляется на основе климатических спектров морского волнения [1]. В отличие от имеющихся исследований [2-7] концептуальная модель существенных свойств исследуемой проблемной области определяет построение интеллектуальной системы (ИС) исследовательского проектирования, обеспечивающей возможность решения задач динамики судна в рамках формального и строгого определения понятий и закономерностей естественной классификации и формального аппарата теории систем [8].

Синтез моделей обработки информации при анализе и прогнозе динамики судна в интегрированной вычислительной среде определяет методы исследования проблем поведения сложных нелинейных моделей, особенно в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды [9], [10]. При этом актуальными представляются проблемы адаптивного синтеза информационно-вычислительных конфигураций на основе достижений искусственного интеллекта (ИИ). В совокупности эти направления определяют общую проблему разработки теоретических основ построения программно-аппаратного комплекса интегрированной системы исследовательского проектирования.

Анализ задач, решаемых в рамках интегрированной ИС исследовательского проектирования морских динамических объектов, позволяет выделить ряд особенностей:

– сложность алгоритмов и большое количество исходных данных с существенно различной структурой;

– жесткие требования к производительности вычислительной системы исследовательского проектирования, необходимость вычислений отдельных задач динамики судна в режиме реального времени;

– операции с множеством разнообразных по своим свойствам объектов (характеристики динамического объекта (ДО) и ветро-волновых режимов) и отношений между ними.

При реализации этих задач адаптивный синтез и распараллеливание компьютерных программ осуществляются путем систематического выполнения трансформаций программ, представленных схемными правилами. Однако многие распараллеливающие преобразования удобнее задать в процедурном виде. Представленные в виде правил трансформации знания (схемные правила) о методах распараллеливания программ можно накапливать и использовать с помощью подсистемы организации данных интегрированной ИС [10].

Поток информации, реализующий концептуальную модель исследовательского проектирования при интерпретации решений на основе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислительных средств, представлен на рис. 1.




Рисунок 1 – Динамическая модель системы обработки информации на основе концепции климатических спектров морского волнения

Функциональные блоки, с помощью которых реализуется процесс обработки информации, представлены на схеме рис. 2. Здесь выделена последовательность преобразования информации – от базы данных ИС исследовательского проектирования – до и выдачи практических рекомендаций для принятия обоснованного решения.

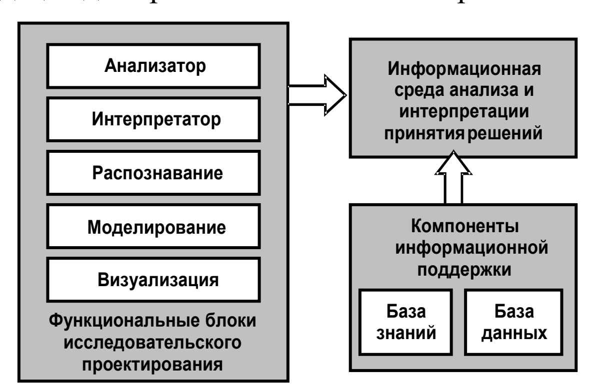



Рисунок 2 – Функциональные блоки системы интеллектуальной поддержки конструктора, реализующие технологию интеллектуальных систем

# Принципы обработки информации в задачах исследовательского проектирования морских судов

Повышение эффективности функционирования, достоверности оценки и прогноза исследуемой ситуации в вычислительных комплексах, использующих интеллектуальные технологии, достигается с использованием парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде (рис. 3) [10]. Расширение функциональных возможностей системы обеспечивается на основе принципов открытости, сложности и конкуренции в рамках концепции мягких вычислений [10], [11]. Ниже дается краткая характеристика этих принципов, использование которых ориентировано на новые поколения систем исследовательского проектирования морских ДО с учетом реальных данных о климатических спектрах морского волнения в районе их эксплуатации [1].

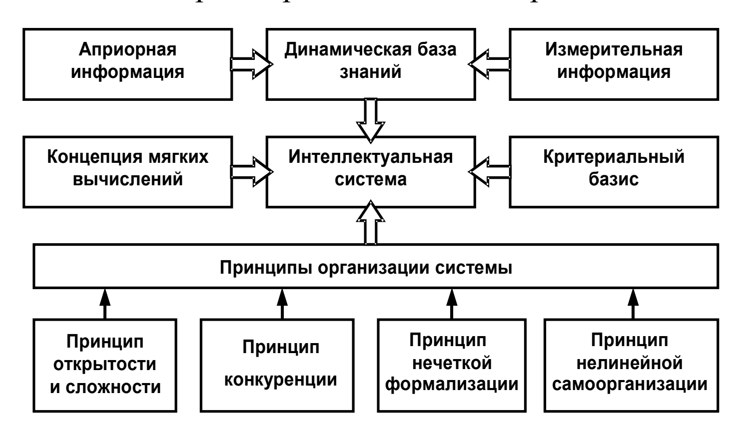



Рисунок 3 – Принципы организации системы исследовательского проектирования морских судов на основе технологии интеллектуальных систем

Принцип открытости. Практические приложения методов искусственного интеллекта (ИИ) при оценке поведения морских ДО развиваются в направлении анализа и моделирования сложных систем, что определяется сложностью взаимодействия исследуемых объектов с окружающей средой. Подобные системы и взаимодействия связаны с понятием открытых систем, включающих большое количество различных элементов. Причем значительную роль в задачах интерпретации динамики взаимодействия стали играть не только сами элементы системы (внешнее возмущение, динамика объекта), но и взаимодействия между ними [10].

Анализ открытой системы позволяет отметить следующие особенности:

1. Возможность анализа элементов системы исследовательского проектирования морских ДО во взаимосвязи с окружающей средой.

2. Более глубокое и качественное понимание особенностей самой системы исследовательского проектирования морских ДО, причинно-следственных связей между ее элементами, описывающими реальную динамику взаимодействия. Возможность анализа особенностей функционирования системы в нестационарной динамической среде.

3. Изучение истории изменений системы взаимодействия морского ДО, неотрывно связанной с внешней средой и накопленной информацией в процессе проектирования и проведения модельного и натурного эксперимента.

Таким образом, открытость системы исследовательского проектирования нового поколения представляет богатые возможности для ее понимания и использования при интерпретации поведения морских судов. Однако моделирование таких систем в усло-

виях неопределенности и неполноты исходной информации даже при отсутствии внешних возмущений является непростой задачей. В качестве одного из направлений решения таких трудно формализуемых задач можно использовать эволюционное моделирование, для осуществления которого необходимо разработать строгую методологию в виде набора правил. При этом практический интерес представляет моделирование эволюции потенциально сложных объектов новой техники, обладающих в то же время широкой областью применения и алгоритмической универсальностью.

**Концепция «мягких вычислений»**. Теоретическая база создания ИС формируется на основе эффективного сочетания накопленной системы знаний с новыми подходами и парадигмами ИИ. Среди них важная роль принадлежит методам и моделям, обеспечивающим формализацию и интеграцию знаний, механизм логического вывода, поиск решений и выдачу практических рекомендаций. Наряду с традиционными методами «инженерии знаний» [2] здесь находит применение концепция «мягких вычислений» [10], [11] (рис. 4).




Рисунок 4 – Концепция «мягких вычислений»

Эффективность взаимодействия конструктора с ИС исследовательского проектирования новых поколений достигается за счет реализации методов и средств повышения человеко-компьютерного взаимодействия при принятии решений в сложных, особенно в нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуациях – когнитивной парадигмы, средств мультимедиа и виртуальной реальности. Особенности применения методов математического моделирования в ИС новых поколений состоят в том, что в процессе построения моделей динамики объекта и внешней среды возникает ошибка аппроксимации, что подчеркивает важность использования надежной информации при реализации адаптивной компоненты динамической базы знаний в задачах совершенствования алгоритмического и программного обеспечения ИС, осуществляющей интеллектуальную поддержку реализации методов и моделей проектирования и теории корабля и экспериментальной гидромеханики.

**Концепция конкуренции**. Повышение достоверности оценки и прогноза исследуемой ситуации достигается с использованием парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде, основанной на развитии концепции «мягких вычислений». Парадигма предусматривает использование двух теоретических принципов (рис. 5), позволяющих обеспечить рациональную организацию вычислительной технологии обработки данных измерений в задаче анализа и прогноза развития экстремальной ситуации, а также формализовать поток информации при реализации нечеткого логического вывода в мультипроцессорной вычислительной среде [12].

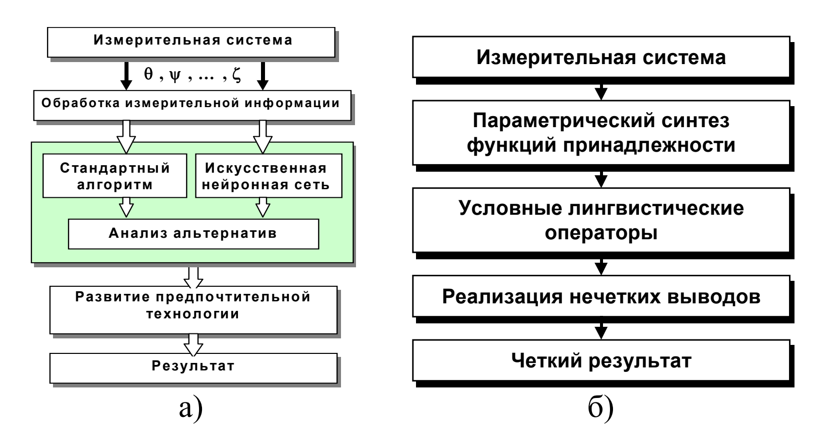



Рисунок 5 – Поток информации при реализации принципа конкуренции (а) и принципа формализации нечеткой информации (б)

Принцип конкуренции при выборе вычислительной технологии обеспечивает сравнительный анализ результатов оценки ситуации с использованием традиционных алгоритмов и нейросетевых моделей. Используемые процедуры параллельной обработки информации при реализации этого принципа отражают процесс функционирования вычислительного комплекса ИС исследовательского проектирования – от момента получения информации до процедуры логического вывода и выработки практических рекомендаций.

**Формализация нечеткой информации**. Принцип формализации нечеткой информации в мультипроцессорной вычислительной среде позволяет осуществлять параллельные цепочки нечеткого вывода в непрерывно изменяющихся условиях динамики объекта и внешней среды [10]. Использование принципа формализации обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде:

– открывает перспективы программной реализации сложных моделей представления и обработки нечеткой системы знаний;

– обеспечивает функционирование комплекса в режиме реального времени и сокращает расходы на разработку аппаратного обеспечения механизма нечеткого вывода;

– устраняет трудности решения задач при распараллеливании вычислительного процесса с существенной нерегулярностью вычислений, характерной для задач исследовательского проектирования, реализуемых на базе интегрированных комплексов.

При реализации сформулированных выше принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [12] необходимо руководствоваться следующими утверждениями:

Утверждение 1. Анализ альтернатив и принятие решений в задачах контроля поведения исследуемого ДО в сложных ситуациях динамической осуществляется с использованием критериев, определяющих приоритетность решения $F(u)\to[0,1]$.

Утверждение 2. Реализация конкурирующих вычислительных технологий при интерпретации методов проектирования и теории корабля связана с принятием решения в условиях априорной неопределенности. Нечеткая критериальная база выбора решения определяется особенностями взаимодействия ДО с внешней средой в исследуемой ситуации.

Утверждение 3. Оценка полезности решения при наличии информации «задача – решение – критерий» определяется путем формирования нечеткой модели знаний и композиционного правила, которые определяют отличие полученного качества решения от желаемого с учетом системы предпочтений конструктора, определяющих приоритетность решения.

Реализация утверждений 1 – 3 дает возможность повысить эффективность принимаемых решений при функционировании ИС исследовательского проектирования в условиях неопределенности и неполноты исходной информации, особенно при непрерывном изме-

нении динамики объекта и внешней среды. Практическая значимость обработки информационных потоков в реальном времени обусловлена стремлением повысить скорость машинных вычислений путем распараллеливания алгоритмов и реализации их на высокопроизводительных вычислительных платформах.

Проверка корректности алгоритмов принятия решений осуществляется формальным путем на основе требований к алгоритмическому обеспечению системы. Применительно к параллельным алгоритмам логического управления понятие корректности связано со специфическими свойствами таких алгоритмов: непротиворечивостью, устойчивостью и самосогласованностью [10].

**Принцип сложности**. Противоречие между усложнением разрабатываемых моделей взаимодействия судна с внешней средой и необходимостью применения традиционных методов теории корабля и экспериментальной гидромеханики определяет одну из важнейших задач интерпретации динамических ситуаций – разработку методологии математического моделирования движения морского судна с учетом требований не только к адекватности, но и к сложности самой модели. Решение данной задачи включает в себя разработку методов и алгоритмов, обеспечивающих в условиях неточности и неопределенности информационного обеспечения направленный поиск оптимальных моделей. При этом критериальное пространство учитывает не только близость выхода модели принятому эталону, но и ее сложность, поскольку она прямо связана с полнотой учета в модели имеющихся априорных данных [10].

Принцип сложности ориентирован на удовлетворение все возрастающих потребностей исследовательского проектирования судов не только в методах синтеза проектных решений, но и математического моделирования их поведения, особенно в сложной динамической среде. На базе принципа сложности создана общая теория сложности систем [13], которая требует конкретизации ее положений применительно к задачам моделирования поведения морских судов. Расширение спектра решаемых задач исследовательского проектирования приводит к использованию новых подходов и обобщений, так как сложность модели представляет собой показатель, характеризующий реализацию вычислительной технологии, обеспечивающей достижение цели при заданном уровне качества моделирования, характеризующего степень (полноту) выполнения моделью основной цели моделирования и интерпретации полученных данных.

Сложность является одним из главных факторов, формирующих облик модели взаимодействия судна с внешней средой. Принцип сложности в системе исследовательского проектирования может быть использован и при моделировании поведения морских судов по данным экспериментальных исследований в терминах «вход-выход», и в категориях пространства состояний, а также по различным видам информационного и алгоритмического обеспечения. Применение принципа сложности при математическом моделировании динамики взаимодействия судна с внешней средой в условиях неопределенности и неполноты исходной информации требует определения искомой модели совместно с оценкой ее сложности: «реализация модели – сложность модели» как единого целого. Такой подход отвечает концепции Л. Заде о переходе к учету при математическом моделировании нечетких факторов в рамках теории нечетких множеств.

Принцип нелинейной самоорганизации. Функционирование системы исследовательского проектирования связано с контролем ситуации и прогнозированием ее развития в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды [14]. Обеспечение контроля осуществляется на основе адаптивных алгоритмов, способных изменять свою структуру при изменении поведения морского ДО. При синтезе таких алгоритмов используют различные подходы – детерминистский, стохастический и подход на основе

принципов самоорганизации. Первые два подхода предполагают наличие в исходных данных полного информационного базиса, т.е. всех определяющих параметров и факторов, которые необходимо учитывать при анализе ситуации. Принцип нелинейной самоорганизации требует минимального объема априорной информации. Методологической основой этого принципа является допущение о том, что вся информация о структуре и поведении динамической системы содержится в данных измерений и критериальных соотношениях, определяющих выбор структуры модели.

Для прогнозирования состояния морского ДО в условиях непрерывного изменения внешней среды необходимо сформулировать математическую модель, содержащую всю необходимую информацию о параметрах и изменении состояния объекта в течение заданного интервала времени. Именно поэтому принцип нелинейной самоорганизации наиболее эффективен в задачах контроля и прогнозирования экстремальных ситуаций, связанных с внезапными (скачкообразными) изменениями в поведении объекта. На основании данных прогноза система вырабатывает практические рекомендации таким образом, чтобы избежать этой опасности. Реализация принципа нелинейной самоорганизации при разработке базы знаний ИС исследовательского проектирования требует большого объема вычислительных операций, связанных с предварительной оценкой динамики объекта на основе математического моделирования экстремальных ситуаций с последующей формулировкой соответствующих критериальных оценок [10].

## Преобразование информации в рамках нечеткого логического базиса

Интерпретация текущих ситуаций в сложной динамической среде осуществляется в рамках принципа конкуренции [12], обеспечивающего выбор предпочтительной вычислительной технологии обработки информации на основе концепции мягких вычислений [11].

Рассмотрим прикладную теорию: концепцию принципа конкуренции (Competition Principle Concept – CPC) как систему вида [12]:

$$CPC \Rightarrow S: \; S = \langle R, P, Q \rangle, \quad (1)$$

где S – система, отображающая теорию CPC; R – классы всех операций и математических зависимостей, описываемых CPC; P – совокупность операций на множествах R; Q – множества отношений между элементами класса R.

На основе отображения (1) представим компьютерную интерпретацию теории CPC как

$$J(CPC)\; S^*: S^* = \langle R^*, P^*, Q^* \rangle, \quad (2)$$

Здесь символ «*» указывает на различие между указанными множествами, определяемыми особенностями компьютерной интерпретации. Условия сохранения целостности информации о динамике взаимодействия обеспечиваются путем реализации парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [12]. Необходимая производительность достигается с помощью процессоров, которые являются узлами вычислительной сети единой распределенной системы. При реализации принципа конкуренции используется бортовой многопроцессорный комплекс стандартной архитектуры [10].

**Нечеткая среда моделирования**. Построение нечеткой среды моделирования, включающей различные сочетания исследуемых сценариев взаимодействия, осуществляется в виде ситуационной модели игры с динамически меняющимся классом стратегий и управляемым сценарием. Для решения этой задачи предварительно формулируется сценарий, описываемый конечным графом [10]:

$$G = (S_S, W_S). \quad (3)$$

Здесь структура $S_S = \bigcup_{t_j} S_S^{t_j}$ представляет собой объединение всех рассматриваемых (эталонных) ситуаций $S_S^{tj}$ с учетом моментов времени, определяющих управления $t_j$, $j=1,\ldots,N$, а структура $W_S \subseteq S_S \times S_S$ описывает переходы между эталонными ситуациями с помощью отображения множества тактик оператора как лица, принимающего решения $I_1$ – в множество дуг $\delta_A t_j : A^{I(tj)} \to W_S$ и полезностей этих тактик – в множество дуг $\delta_U t_j$: $U^{I(tj)} \to W_S$.

Задача нечеткого моделирования сводится к построению ситуационной модели с динамически изменяющимся классом стратегий и управлением сценариями. Алгоритм решения этой задачи реализуется в виде последовательности шагов, представленных на рис. 6. Генерация сценариев взаимодействия судна с внешней средой при функционировании ИС исследовательского проектирования осуществляется на основе модели типа «сущность – связь» [10].

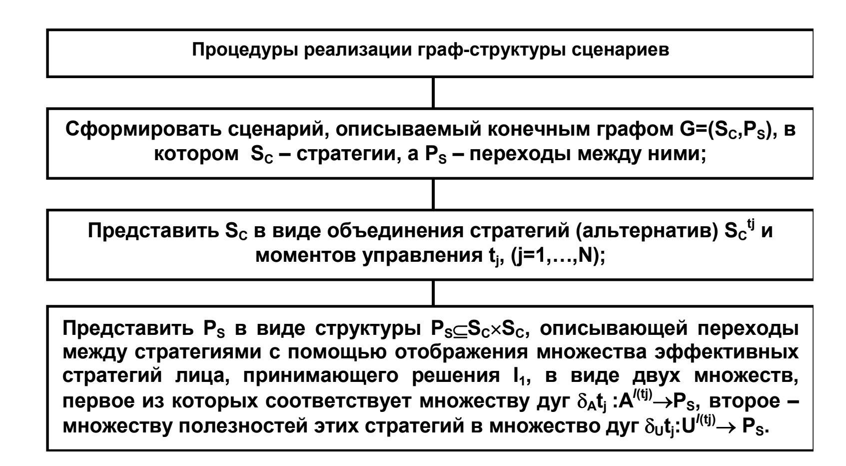



Рисунок 6 – Алгоритм генерации сценариев взаимодействия

Композиционная модель нечеткого вывода в динамической базе знаний ИС исследовательского проектирования описывает связь всех возможных состояний логической системы с управляющими воздействиями и формально записывается в виде (X, R, Y), где $X=\{x_1,\ldots,x_n\}$; $Y=\{y_1,\ldots,y_m\}$ – базовые множества, на которых заданы входы $A_i$ и выходы $B_i$ нечеткой системы; R – нечеткое соответствие «вход – выход», которое строится на основе формализации нечетких стратегий. Принятие решений при функционировании нечеткой системы знаний осуществляется на основе модели [10]:

$$\text{«if } A_1 \text{– then } B_1, \text{ else if } A_2 \text{ then } B_2, \ldots, \text{ else if } A_N \text{ then } B_N\text{».} \tag{4}$$

Здесь $A_1,\ldots,A_N$ – нечеткие подмножества, определенные на базовом множестве X, а $B_1,\ldots,B_N$ – нечеткие подмножества из базового множества Y. Эти нечеткие подмножества задаются с помощью функций принадлежности:

$$\mu_{Ai}(x),\ \mu_{Bi}(y),\ (x \in X,\ y \in Y),$$

$$R = A \times B = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \{\mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_i) \,|\, (x_i, y_i)\} \tag{5}$$

или

$$\mu_R(x,y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)), \tag{6}$$

где $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$ – ФП элементов x, y множествам A и B.

В качестве нечеткой импликации при реализации механизма логического вывода в ИС использованы алгоритмы Мамдани и Сугено [10].

Алгоритмы преобразования информации при реализации механизма логического вывода в ИС представлены на основе продукционных моделей [9], [10]:

$$\langle \text{If X, then Y, else Z} \rangle; \quad (X \rightarrow Y\,(Z)), \tag{7}$$

где X, Y, Z – нечеткие множества, определенные на универсальных множествах U, V, W; множества X, Y, Z интерпретируются как нечеткий вход и нечеткий выход некоторой системы, отношения между которыми определяются моделью нечеткой системы.

При интерпретации модели (7) используются различные встроенные процедуры, основанные на применении аппарата статистического анализа, методов математического моделирования, методов качественного исследования дифференциальных уравнений на фазовой плоскости и др. Наряду с методами традиционной математики и аппаратом нечеткой логики здесь находят также широкое применение теория ИНС [4] и генетические алгоритмы [15].

Механизм, обеспечивающий логику функционирования и выработку решений по мере поступления информации о параметрах ДО и внешней среды, основан на выводе решений с помощью формальной процедуры [10]:

$$F_i : \; S_k(t_i) \rightarrow U_j \quad (k = 1,\ldots,n;\; j = 1,\ldots,J;\; i = 1,\ldots,N), \tag{8}$$

где $S_k(t_i)$ – ситуация в момент времени $t_i$ ; $U_j$ – решение; $F_i$ – множество правил.

При разработке сценариев взаимодействия судна с внешней средой широко используются методы планирования эксперимента. Содержательный анализ проблем моделирования, определяемых соотношением между реальным экспериментом, модельным экспериментом и теорией, свидетельствует о постоянном внимании исследователей к поиску возможных стратегий моделирования с учетом особенностей исходной информации. Развитие этих подходов связано с применением ИС и стремительно растущей производительностью вычислительных средств.

## Особенности представления и использования знаний в системе исследовательского проектирования нового поколения

Анализ теоретико-экспериментальных исследований позволил авторам сформулировать концепцию и научно-обоснованный подход к решению трудно формализуемых задач в ИС новых поколений. В основу концепции и подхода принято положение о том, что значительное большинство трудно формализуемых задач динамики сложных объектов может быть сформулировано как задача выбора предпочтительного варианта из нескольких возможных решений, сгенерированных на основе разработанной стратегии.

Теоретический базис решения трудно формализуемых задач методами теории катастроф при функционировании бортовых ИС предусматривает учет следующих основных положений:

1. Неформализованная задача формулируется как задача выбора варианта решения из нескольких задач, представленных в рамках классической математики и в нейро-нечетком логическом базисе.

2. При решении текущей задачи контроля динамики сложного объекта необходимо использование гипотез и упрощающих предположений на базе фактической информации о поведении ДО, особенно данных динамических измерений.

3. Выбор предпочтительного решения ведется с использованием результатов генерации альтернатив, деревьев решений и принципа конкуренции [10], [12].

При недостаточном объеме исходной информации при функционировании ИС должна быть предусмотрена процедура перехода системы в режим вывода по прецедентам [10]. Такой режим позволяет использовать накопленную информацию о динамике взаимодействия системы «Внешняя среда – ДО» при различном уровне внешних возмущений. При возникновении нештатных ситуаций ИС переходит на режим поддержания механизма логического вывода с помощью адаптивной компоненты [10], используя процедуры вывода на основе принципа адаптивного резонанса [12].

В рамках описанного подхода осуществляется формализация задачи выбора и принятия решений на основе современной теории катастроф. Для этого используется модель преобразования информации при анализе трудно формализуемых задач, представленная на рис. 7.

Модель содержит три массива данных [16]:

– вектор условий, определяющий множество условий существования решений $X = \{X_1, \dots X_n\}$,

– вектор решений, включающий множество решений $Y = \{Y_1, \dots, Y_m\}$;

– матрицу соответствия, задающую модель связи между условиями и решениями.

Приведенная на рис. 7 формальная модель преобразования информации открывает возможности поиска решений с использованием древовидных структур, характерных для исследуемых задач. Такая модель не зависит от содержания задачи и является универсальным аппаратом анализа и поиска решений. При этом открывается возможность «сжатия» информации, поскольку из данных динамических измерений извлекается только та информация, которая минимально необходима при контроле ситуации, вся остальная информация – отсеивается.

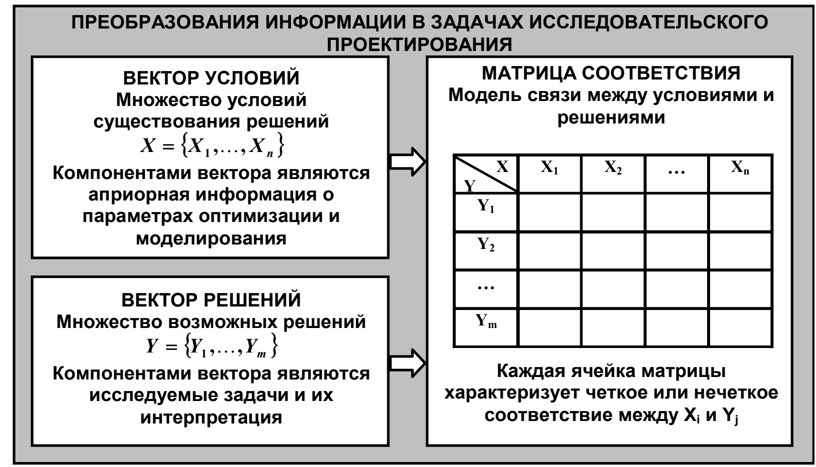



Рисунок 7 – Модель преобразования информации при анализе трудно формализуемых задач

Решение проблемы неоднозначности при выборе наилучшего решения осуществляется на основе нечеткой логики. Для входных параметров строятся функции принадлежности и по ним определяются соответствующие степени принадлежности. Для символьных входных параметров значения степеней принадлежности устанавливают субъективно – на основе бинарных сравнений. В сложных задачах анализа и интерпретации экстремальных ситуаций проблема неоднозначности решается с помощью интегрированных нейронных сетей. Разработанная концепция и подход к анализу трудно формализуемых задач осуществляется в ИС исследовательского проектирования новых поколений на основе

динамической базы знаний. Такая структура позволяет формализовать поток информации путем различных связей между входными и выходными параметрами исследуемых нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуаций. Разрабатываемые программные средства функционирования ИС позволяют использовать достоинства различных формализмов – компактность, простоту и полноту содержания знаний в продукционных моделях, реализуемых в мультипроцессорной вычислительной среде [12].

# Аксиоматическое представление знаний

Общие понятия предметной области специфичны в каждой прикладной онтологии. Среди них универсальной конструкцией являются отношения. В качестве базиса такой конструкции обычно выделяют такие отношения модели предметной онтологии, как part_of, kind_of, contained_in, member_of, see_olso и некоторые другие. Отношение part_of является отношением «часть – целое», определяется на множестве концептов и по свойствам близко к is_a. Отношение see_also обладает другой семантикой и свойствами и вводится не декларативно, а процедурно [17]. Наибольший интерес для работы со структурами, содержащими большой объем процедурных знаний, представляет подход [18], предусматривающий аксиоматическое представление знаний предметной области.

Применительно к теории проектирования судов аксиоматическое представление знаний при формализации информации на основе комплексной онтологии предусматривает использование следующих аксиом (рис. 8).

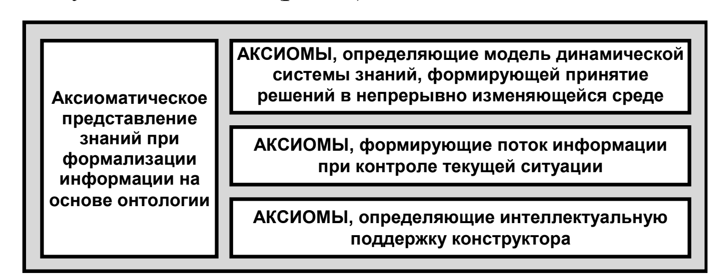



Рисунок 8 – Формализация и аксиоматическое представление процедурных знаний

Реализация указанных аксиом осуществляется совместно с аксиомами идентификации, вычислений, планирования и оптимизации, рассмотренных в работе [18]. Дадим краткую характеристику этих аксиом.

**Аксиомы идентификации**. Назначением аксиом идентификации является описание всех типов переменных и отношений, в которые эти переменные вступают друг с другом. Если объект управления описывается множеством параметров $X=\{X_1,\ldots,X_N\}$ (включая все известные и неизвестные, постоянные и переменные, исходные и промежуточные, оценочные и конструктивные), то требуется находить или уточнять значения части параметров. При этом каждый из параметров характеризуется определенным интервалом значений, с помощью которого также задаются известные параметры и ограничения в задачах оптимизации.

**Аксиомы планирования**. В основе вычислений лежит свойство интервальной арифметики, позволяющее осуществить сходимость итеративной процедуры вычислений интервальных значений параметров к некоторым локализующим интервалам, содержащим требуемые решения. Для осуществления итеративной процедуры вводятся аксиомы планирования, задающие правила (порядок и условия корректности) вычислений.

**Аксиомы вычислений**. С помощью аксиом вычислений задаются правила вычисления отношений. Каждое отношение $r_i=r_i(Y_i)$ связывает некоторое множество

параметров $Y_i$ и используется для вычисления неизвестных значений параметров $Y_i^{вых} \subseteq Y_i$, связанных отношением по известным значениям параметров $Y_i^{вх} \subseteq Y_i$. Аксиомы вычислений включают также аксиомы оптимизации. В отличие от аксиом идентификации, вычисления и планирования, эти аксиомы позволяют давать ответы на поставленные прямые и обратные вопросы при решении задач поиска оптимальных решений. Аксиомы оптимизации содержатся в каждом дереве классификации концептов формальной системы и представляются в виде таблиц логических аксиом (Logical Axioms Table). Структура таблиц включает имя аксиомы, описание, концепт, ссылочные атрибуты, переменные и определения. Таблицы аксиом содержат определения концептов через логические выражения. Для каждой аксиомы дается ее имя, естественно-языковое описание, концепт, к которому аксиома относится, атрибуты, используемые в аксиоме, логическое выражение, формально описывающее аксиому и др.

Таким образом, модель онтологической системы, определяющей функционирование динамической базы знаний ИС, позволяет описывать онтологии разных уровней. Основой интеллектуализации компьютерных технологий, реализующих методы ИИ в ИС, является погружение знаний в исследуемой предметной области в высокопроизводительную вычислительную среду. Одна из особенностей сложных динамических систем – разнообразие знаний, используемых при их создании и использовании. Поэтому для разработки интеллектуальных технологий, поддерживающих интеграцию компонент динамической базы знаний ИС, необходимо создание базового формального аппарата представления и интеграции знаний [10], [18].

## Многокритериальная оптимизация в исследовательском проектировании на основе интеллектуальных технологий

При генерации альтернатив и выборе решения в ИС исследовательского проектирования на основе принципа конкуренции приходится сталкиваться с анализом многокритериальных задач (рис. 9). При решении таких задач рассматривают различные вычислительные технологии: стандартные алгоритмы, эволюционное моделирование, нейро-нечеткие системы и др. В практических приложениях удобно использовать графическую интерпретацию решения как многокритериальной задачи, позволяющую избежать использования дополнительной информации и получать решения близкие к оптимальным. Графическая модель оценки проектных решений, реализующая процедуру многокритериальной оптимизации, получила название метода эталонов [5].

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ

Принцип конкуренции при анализе альтернатив и выборе вычислительной технологии

Принцип обработки информации в мульти-процессорной вычислительной среде

Стандартная модель

Нечеткая модель

Нейросетевая модель

Модели многокритериальной оптимизации

Рисунок 9 – Принципы и модели многокритериальной оптимизации в ИС исследовательского проектирования

В задаче многокритериальной оптимизации рассматривается вектор переменных X и множество значений $X_k$, принимаемых для k-й переменной, и вводятся в рассмотрение критерии $G_i(X)$ и ограничения $C_j(X)$, (i = 1,…,n; j = 1,…,m) так, что величины $K_i$ и $W_j$ соответствуют наилучшему и наихудшему значениям i-го критерия. Тогда формальная постановка многокритериальной задачи принимает вид:

$$\begin{cases} \forall i: \quad G_i(x) \to \max(\min); \\ \forall j: \quad C_j(x) \le b_j; \\ \forall k: \quad x_k \in X_k;\ X = \{x_1, \dots, x_m\}. \end{cases} \tag{9}$$

Величина $K_i$ определяется решением однокритериальной задачи:

$$\begin{cases} K_i(x) = G_i(x) \to \max(\min); \\ \forall j: \quad C_j(x) \le b_j; \\ \forall k: \quad x_k \in X_k;\ X = \{x_1, \dots, x_m\}. \end{cases} \tag{10}$$

Для каждого из критериев решение задачи (9) позволяет получить вектор:

$$K = \{K_1, \dots, K_n\}, \tag{11}$$

которому в n-мерном пространстве критериев $G_i(X)$ соответствует наилучшее их решение. Другой эффективный путь решения задач многокритериальной оптимизации состоит в использовании методов эволюционного моделирования [8], [14]. В сложных ситуациях переходят на использование технологии нейро-нечетких систем [19].

# Высокопроизводительные вычисления при реализации интеллектуальных технологий в исследовательском проектировании

Практическая реализация методов и моделей, разработанных в рамках концепции конкуренции при решении задач исследовательского проектирования осуществляется в процессе функционирования ИС новых поколений. Основные принципы использования этих методов связаны с выполнением высокопроизводительных вычислений в мультипроцессорной вычислительной среде. Это накладывает жесткие ограничения на алгоритмы интерпретации проектных решений и ситуаций, связанных с оценкой динамики судов на волнении, особенно нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуаций.

Характерной особенностью ИС новых поколений исследовательского проектирования, является многообразие условий работы (многорежимность), а также их реактивность, т.е. способность выполнять сложные вычислительные и логические операции в режиме реального времени. Высокая производительность обработки информации обусловлена сложностью и высоким темпом запуска алгоритмов для обеспечения высокого качества решения функциональных задач и эффективности реализации вычислительных процедур анализа и прогноза развития текущей ситуации. Указанные особенности обеспечиваются комплексом технических решений, реализованных в аппаратном обеспечении, операционной системе и компиляторе.

Объединение в единую вычислительную систему с общей памятью ряда процессорных единиц открывает новые возможности, связанные с построением высокопроизводительного параллельного вычислительного комплекса [20]. Развиваемый параллелизм обработки информации в ИС реального времени складывается из многопоточного параллелизма на микроуровне и многозадачного параллелизма – на макроуровне (рис. 11).

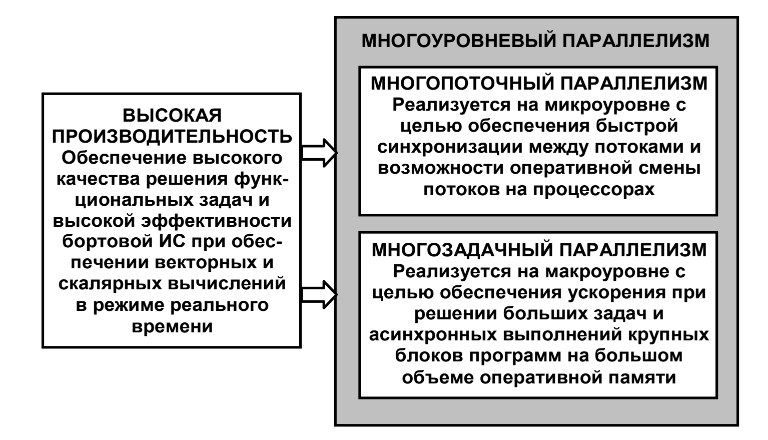



Рисунок 11 – Параллельная обработка информации в мультипроцессорной вычислительной среде

Многопотоковый параллелизм позволяет использовать все преимущества «близости» процессоров в многопроцессорном вычислительном комплексе, обеспечивая быструю синхронизацию между потоками информации и возможность оперативной смены потоков на процессорах. Все это позволяет компилятору эффективно распараллеливать сильно связанные вычисления, разделяя их на небольшие потоки вычислений и распределяя потоки между процессорами.

Многозадачный параллелизм позволяет асинхронно выполнять крупные блоки программ на большом объеме оперативной памяти, которая является суммой оперативной памяти всех кристаллов распределенной системы. В итоге распараллеливание на уровне задач дает возможность не только ускорить выполнение больших задач за счет распараллеливания, но и разместить в оперативной памяти данные, которые не могут быть размещены и обработаны на одном кристалле ввиду их большого объема.

Задача компилятора – проанализировать исходную программу и обнаружить фрагменты программы, которые могут быть выполнены параллельно. Очевидно, что современные распараллеливающие компиляторы должны содержать мощные методы для обнаружения и использования параллелизма. Такие компиляторы должны использовать комбинации статических и динамических методов, включать символьную алгебру и анализ. При разработке новых методов необходимо проанализировать реальные программы современной интерпретации алгоритмов, используемых в ИС исследовательского проектирования для того, чтобы оценить эффективность разрабатываемых методов распараллеливания.

В качестве базовой концепции в предлагаемом подходе используется теория структурных функциональных моделей [20]. Данная теория хорошо подходит для решения задачи синтеза последовательных рекурсивных программ обработки информации в сложных динамических средах. Для того чтобы можно было использовать теорию структурных функциональных моделей для построения схем параллельных программ, сформулировано правило, которое позволяет строить параллельные предложения вычислимости для используемой системы знаний.

**Правило параллельной вычислимости**. Пусть дано некоторое множество исходных величин A, характеризующих поток измерительной информации, и два предложения вычислимости $F_1$ и $F_2$, которые по A доставляют множества величин X и Y соответственно. Тогда, если

$$X \cap Y = \varnothing \text{ и } X \not\subset A \text{ и } Y \not\subset A, \qquad (12)$$

то $F_1$ и $F_2$ будем называть независимыми и обозначать как $F_1 || F_2$ (т.е. $F_1|_I$ и $F_2|_I$ могут быть выполнены параллельно). Определим правило параллелизма и запишем его в следующем виде:

$$F_1{:}A \rightarrow X \;\; F_2{:}\ A \rightarrow Y \;//\; F_1 \,||\, F_2{:}\ A \rightarrow X,Y. \qquad (13)$$

Добавим данное правило в принятое исчисление SR и назовем расширенное исчисление как $SR_{par}$. Для вычисления $SR_{par}$ справедливо следующее утверждение: исчисление $SR_{par}$ является корректным и полным относительно понятия «предложение вычислимости».

# Интерфейс конструктора ИС исследовательского проектирования

В процессе функционирования системы исследовательского проектирования предоставляется возможность человеко-компьютерного взаимодействия в условиях многофункциональных средств интеллектуальной поддержки множества категорий конструкторов, работающих с разными информационными ресурсами. При этом обеспечивается ввод, вывод и редактирование исходных, промежуточных и итоговых данных и решение задач формирования сценария оценки ситуации, а также ввода данных для оценки и отображения результатов вычислений и моделирования.

Особенно сложной является организация адекватного диалога, содержащего компоненты, связанные с разработкой, редактированием и генерацией сценариев диалога в нестандартных и экстремальных ситуациях, требующих привлечения графической информации, в том числе и когнитивной (связанной с восприятием и пониманием задачи) компьютерной графики [17]. Формирование сценария диалога и декомпозиция процесса взаимодействия «Конструктор – ЭВМ» с учетом механизма адаптации под конкретного пользователя обеспечивают интерфейсу свойства интеллектуальности (рис. 12).

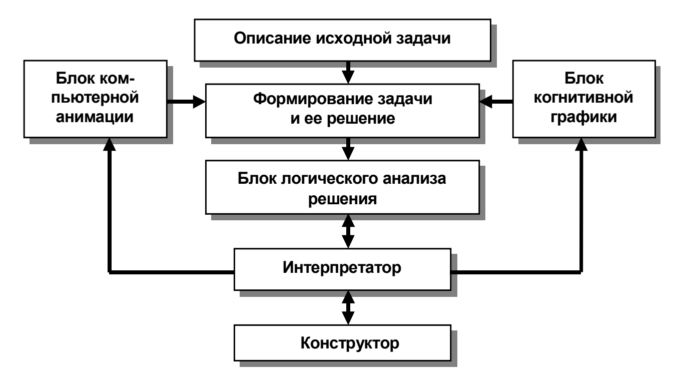



Рисунок 12 – Интерфейс «Конструктор – ЭВМ»

Уровень интеллектуальности интерфейса «Конструктор – ЭВМ» характеризуется сложностью взаимодействующих систем: конструктора (К) и технической системы (ТС), обеспечивающей интеллектуальную поддержку принятия проектных решений. Пары взаимодействующих систем могут быть упорядочены по степени сложности:

$$(\text{ТС} \Leftrightarrow \text{ТС}) < (\text{ТС} \Leftrightarrow \text{К}) < (\text{К} \Leftrightarrow \text{ТС}) < (\text{К}_i \Leftrightarrow \text{К}_j). \qquad (14)$$

В ТС преобладает количественная сторона обеспечения информационного процесса – объемы и скорость передачи информации, а в системе К – качественная, связанная с нестандартной обработкой текущей информации, взвешенностью оценок и учетом многих факторов при анализе ситуации.

# Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что динамическая среда ИС исследовательского проектирования выключает концептуальный и математический уровни представления, связанные обобщенной задачей реализации сложных динамических процессов, связанных с генерацией альтернатив и выбором предпочтительного решения. Используемые для реконструкции знаний ИС в сложной динамической среде формальные модели определяются как семантически-ориентированная информационная среда высокого концептуального обобщения, обеспечивающая возможность интеграции знаний при формализации информации.

Основой интеллектуализации компьютерных технологий, реализующих методы ИИ при проектировании судов, является погружение знаний в исследуемой предметной области в высокопроизводительную вычислительную среду. Одна из особенностей сложных динамических систем – разнообразие знаний при их создании и использовании. Поэтому для разработки интеллектуальных технологий ИС необходимо создание базового формального аппарата представления и интеграции знаний [9], [21].

# Литература

1. Estimation of extreme wave heights / L.J. Lopatoukhin, V.A. Rozhkov, V.E. Ryabinin [etc.] // JCOMM Technical Report, WMO/TD. – 2000. – № 1041. – P. 1-12.
2. Захаров И.Г. Теория компромиссных решений при проектировании корабля / Захаров И.Г. – Л. : Судостроение, 1987.
3. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных систем / Гайкович А.И. – Санкт-Петербург : МОРИНТЕХ, 2001.
4. Нарусбаев А.А. Введение в теорию обоснования проектных решений / Нарусбаев А.А. – Л. : Судостроение, 1976.
5. Пашин В.М. Оптимизация судов / Пашин В.М. – Л. : Судостроение, 1983
6. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей / Худяков Л.Ю. – Л. : Судостроение, 1980.
7. Шауб П.А. Методы функционального проектирования в анализе и синтезе сложных систем / П.А. Шауб // Морская радиоэлектроника. – 2002. – № 1. – С. 44-48.
8. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. – М : Мир, 1978.
9. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / [Александров В.Л., Матлах А.Т., Нечаев Ю.И.]. – Санкт-Петербург : ГМТУ, 2001.
10. Бортовые интеллектуальные системы. Часть 2. Корабельные системы. – М. : Радиотехника, 2006.
11. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM-1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.
12. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю.И. Нечаев // Труды 5-й всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика – 2003». – М. : МИФИ, 2003. – Часть 2 : Лекции по нейроинформатике. – С. 119-179.
13. Солодовников В.В. Теория сложности и проектирование систем управления / В.В. Солодовников, В.И. Тумаркин. – М. : Наука, 1990.
14. Забелинский А.И. Нелинейная самоорганизация как подход к построению прогнозирующих моделей / А.И. Забелинский // Автоматизация и информационные технологии. – 2001. – № 9. – С. 17-19.
15. Нечаев Ю.И. Искусственный интеллект: концепции и приложения / Нечаев Ю.И. – Санкт-Петербург : ГМТУ, 2002.
16. Лазарсон Э.В. Современная технология автоматизированного решения многовариантных задач / Э.В. Лазарсон // Автоматизация и современные технологии. – 2009.
17. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – Санкт-Петербург : Питер, 2000.
18. Девятков В.В. Онтологии в проектировании систем / В.В. Девятков // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-99. – Санкт-Петербург, 1999. – Т. 2. – С. 137-140.
19. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. – М. : Наука, 1997.

20. Ким А.К. Вычислительная система реального времени для реализации программ управления сложными объектами / А.К. Ким, В.М. Фельдман // Информационные технологии. – 2009. – № 2. – С. 2-8.
21. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде. – М. : Мир, 1976.

# Literatura

1. Aleksandrov V.L. Intellektual'nye sistemy v morskih issledovanijah i tehnologijah. Sankt-Peterburg: GMTU. 2001
2. Ashik V.V. Proektirovanie sudov. L.: Sudostroenie. 1985
3. Bellman R. Prinjatie reshenij v rasplyvchatyh uslovijah. M.: Mir. 1976
4. Bogatyrev M.Ju. Trudy vserossijskoj nauchnoj konferencii “Upravlenie i informacionnye tehnologii UIT-2003”. T 2. S. 131-136
5. Bortovye intellektual'nye sistemy. Chast' 2. Korabel'nye sistemy. M.: Radiotehnika. 2006.
6. Vovk S.P. Programmnye produkty i sistemy. №3. 2004. S. 16-22.
7. Vorob'eva G.I. Trudy X vserossijskoj konferencii “Telematika-2003”. T. 1. Sankt-Peterburg. 2003. S. 233-235
8. Vostrov G.N. Iskusstvennyj intellekt. №4. 2008. S. 736-746.
9. Devjatkov V.V. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychislenijam i izmerenijam SCM-99. T 2. Sankt-Peterburg. 1999. S. 137-140.
10. Evgen'ev G.B. Programmnye produkty i sistemy. № 3. 2005. S. 42-46.
11. Zabelinskij A.I. Avtomatizacija i informacionnye tehnologii. № 9. 2001. S. 17-19.
12. Zade L. Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizhennyh reshenij. M.: Mir. 1976
13. Zaharov I.G. Teorija kompromissnyh reshenij pri proektirovanii korablja. L.: Sudostroenie. 1987
14. Zenkin A.A. Kognitivnaja komp'juternaja grafika. M.: Nauka. 1991
15. Gavrilova T.A. Bazy znanij intellektual'nyh sistem. Sankt-Peterburg: Piter. 2000
16. Gajkovich A.I. Osnovy teorii proektirovanija slozhnyh sistem. Sankt-Peterburg: MORINTEH. 2001
17. Kapica S.P. Sinergetika i prognozy budushhego. M.: Nauka. 1997.
18. Kim A.K. Informacionnye tehnologii. №2. 2009. S 2-8
19. Lazarenko G.P. Programmnye produkty i sistemy. №3. 2005. S 35-37
20. Lazarson Je.V. Sovremennaja tehnologija avtomatizirovannogo reshenija mnogovariantnyh zadach. Avtomatizacija i sovremennye tehnologii. 2009.
21. Mesarovich M. Obshhaja teorija sistem: matematicheskie osnovy. M.: Mir. 1978
22. Napalkov Je.S. Avtomatizacija i informacionnye tehnologii. № 4. 2002. S 18-23
23. Narusbaev A.A. Vvedenie v teopiju obosnovanija proektnyh reshenij. L.: Sudostroenie. 1976
24. Nechaev Ju.I. Iskusstvennyj intellekt: koncepcii i prilozhenija. Sankt-Peterburg: GMTU. 2002
25. Nechaev Ju.I. Trudy 5-j vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii “Nejroinformatika-2003”. M.: MIFI. 2003. Lekcii po nejroinformatike. Chast' 2. S. 119-179
26. Norenkov I.P. Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie tehnicheskih ustrojstv i sistem. M.: Vysshaja shkola. 1980.
27. Parfenov I.I. Dokl. RAN. T. 342. № 6. 1995. S. 750-752.
28. Pashin V.M. Optimizacija sudov. L.: Sudostroenie. 1983.
29. Pospelov D.A. Programmnye produkty i sistemy. № 2. 2003. S. 39-43.
30. Poston T. Teorija katastrof. M.: Mir. 1980.
31. Romanov S.V. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychislenijam i izmerenijami SCM-2000. Sankt-Peterburg. T. 1. 2000. S. 108-112.
32. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svjaz'. 1993.
33. Solodovnikov V.V. Teorija slozhnosti i proektirovanie sistem upravlenija. M.: Nauka. 1990.
34. Hudjakov L.Ju. Issledovatel'skoe proektirovanie korablej. L.: Sudostroenie. 1980.
35. Shaub P.A. Morskaja Radiojelektronika. № 1. 2002. S. 44-48
36. Judin A.D. Izv. RAN. Tehnicheskaja kibernetika. №5. 1992. S. 28-49.
37. Groppen V.O. Proceedings of the fifth conference on evolutionary methods of design, optimization and control with applications to industrial and social problems. Spain. Barselona. 2003. P. 133-134.
38. Lopatoukhin L.J. JCOMM Technical Report. WMO/TD. № 1041. 2000. P. 1-12.
39. Winston P.N. Artificial intelligence. USA: Addison Wesley Publishing Company. 1993.
40. Zadeh L. Sommutation on the ASM-1994. Vol. 37. № 3. P. 77-84.

*Статья поступила в редакцию 25.06.2011.*